

近年來國外颱風研究之評介

汪羣從

張隆男

中央研究院物理研究所

中央大學大氣物理系

一、前言

熱帶氣旋是熱帶地區最受注目的天氣現象，它的風雨浪常造成巨大的生命財產損失，也經常為人類帶來許多經濟利益（Sugg et al. 1971, Sugg, 1968）。近年來國內有關颱風的研究很多，而國外在這方面的研究也有很大的進展。大多的參考資料實無法全部在此一一加以介紹，好在有關颱風的介紹性文章或書籍不少，如Riehl (1954), Palmen (1956), Yanai (1964), Miller (1967), Palmen and Newton (1969), Anthes (1974), Atkinson (1971), Fendell (1974), 山岬正紀等 (1976) 以及徐天樂 (1976) 等對颱風的研究成果已有相當詳細的說明。本文僅擇其要者，就颱風之結構，生成與發展，預報及改造等分別加以簡單介紹。

二、颱風的觀測與結構

在沒有探空觀測以前，颱風常被認為是 2~3 公里深度的淺對流系統。一直到 1940 年代，才瞭解此低壓系統可達到 13 公里以上的高度。1943 年以後，美國軍方開始使用飛機觀測，初期的目的祇在幫助實際氣象作業。以研究為目的的觀測始於 1956 年，美國的 NHRP (National Hurricane Research Project, 1960 年後改稱 NHRL) 以兩部飛機同時穿入颱風內部，對主要氣象因素加以連續觀測。許多有關的研究報告陸續發展，對颱風結構的瞭解貢獻很大。雷達的發展對颱風的瞭解，如颱風眼，螺旋狀雨帶等特徵亦甚重要。近年來更由於人造衛星的觀測，不但對颱風結構的觀察助益良多，對其生成發展機制的瞭解及颱風預報更是居功厥偉。

颱風為水平尺度數百公里以上，垂直尺度 10 公里左右之大規模現象。對此現象而言，靜力平衡可以適用，因此為了使颱風中心氣壓降到 960 mb 左右，颱風中心必需為暖心結構，且此暖心結構應

延伸至相當的高度。以颶風 Daisy (1958), Cleo (1958) 及 Hilda (1964) (Colon et al. 1961, La Seur and Hawkins, 1963, Hawkins and Rubsam, 1968) 為例，此暖心結構在對流層上部較為顯着，正溫度偏差的範圍很廣，在 200~300 mb 高度處溫度偏差最大，通常最大偏差達 15°C 以上。對流層下部，特別是在 700 mb 以下，則暖心集中在颱風眼附近處，離中心稍遠處，則溫度偏差極小或為負值。此暖心結構延伸至對流層頂以後，漸成冷心。此暖心與冷心的分界處，根據許多學者的觀察大約在 100 mb 左右，如 Jordan and Jordan (1954) 為 130~70 mb 之間，Steer (1965) 約 120~90 mb, Gentry (1967) 115~90 mb, Sheets (1969) 在 130~100 mb 之間。Frank (1977) 以 10 年的西北太平洋雷達資料分析熱帶氣旋的綜合結構，發現最大溫度偏差在 250 mb 處，至 120~50 mb 處變為冷心。一般的研究顯示颱風的水平溫度梯度在眼牆處最大，向外減小，在眼內部則水平梯度非常小。

通常熱帶大氣之溫度垂直分佈在 500 mb 以下為條件不穩定，但在颱風眼中離地面 1~3 公里以內為絕對穩定，呈等溫或逆溫狀態，在眼牆附近離地面 1 公里以上甚接近濕絕熱遞減率 (Steer, 1965, Hawkins and Rubsam, 1968)。

颱風為一低壓中心，在近地面處之氣壓梯度最大，隨高度之增加氣壓梯度漸減，至 300 mb 處，梯度趨近於零。300 mb 以上氣壓梯度之方向漸漸與下層反向。同時在水平方向，氣壓梯度隨半徑之減小而增加，至最大風速半徑 (RMW) 處達最高值 (Frank, 1977)，溫度梯度在此處也是最大 (Shea and Gray, 1973)。雖然觀測資料不足，Koteswaram (1967) 認為上層之高壓中心之位置應與颱風中心稍有偏差，以便維持靜力平衡之關係。Sheets (1969) 以 1956~1967 年之颱風探空資料統計，發現在 200 mb 處之氣壓場與地面氣壓之相關近於零，150~100 mb 處則為 -0.2~

0.4 之負相關。Bell and Kar-Sing (1973) 也得到類似之結果。

颱風的動能以切線分量為主，但徑向風速與颱風的輻合發散及垂直運動有直接之關係。Palmen and Jordan(1955) 與 Frank(1977) 指出颱風的輻合氣流局限在地面與 800 mb 之間，最大值在 950 mb。發散氣流在 300 至 100 mb 間，以 150 mb 處最大。800 至 300 mb 間徑向氣流非常小，在 400 mb 及 700 mb 處各有一很小的極小值(輻合)及極大值(發散)。

由 Frank(1977) 及 Izawa(1964) 所作的切線風場垂直分佈圖看來，颱風在對流層底部之氣流為氣旋性，其深度與強度隨半徑之減少而增加。範圍則延伸至 1000 公里以外。此氣旋環流之上部，離中心約 2° radius 以外有一反氣旋，此反氣旋之深度與強度則隨半徑之增加而遞增。下層氣旋之風速極大值在 850 ~ 900 mb 處(界面層頂)，上層反氣旋風速最大值在 150 mb 處(發散最大處)。1 至 6 公里處垂直風切很小。

Frank(1977) 發現，颱風環流遠較一般所想像的為大，通常在衛星雲圖顯示的颱風很少超過 $3 \sim 4^\circ$ radius，即主要的對流與其加熱作用局限在此小範圍內。然而颱風的氣旋與反氣旋環流却至少延伸至 15° radius 之外。同時此氣旋與反氣旋交界面的位置並不隨颱風類別而異，似乎表示熱帶低壓的大規模環流並不因颱風內部結構之不同而有所差異。

颱風半徑大於 6° radius 處有微弱的上昇氣流， $4^\circ \sim 6^\circ$ 之間在 400 mb 以下為下降氣流，形成一近乎無雲帶(MOAT)， 4° 以內則上昇氣流逐漸加強(Frank, 1977)，至眼牆處則上昇速度至少達到 6×10^{-2} mb sec⁻¹ (Shea and Gray, 1973)。

颱風的非對稱性早為大家所注意，例如在颱風進行方向的右邊風速較左邊強，即使把颱風前進速度減去，其非對稱性仍然存在。Jordan(1952) 分析颱風高層發散風場，發現有大小不等之小順時針渦旋。Black and Anthes(1971) 以衛星雲圖資料分析亦發現高空形成兩個小渦旋，颱風進行方向的右側者為順時針方向，左側者為反時針。在雷達或衛星雲圖上看到的颱風雨帶亦呈非對稱狀，自接近颱風中心處以螺旋狀順時針的方向向外延伸

。Senn and Hiser(1959) 發現此雲帶通常在接近颱風中心處形成，並以 $5 \sim 15$ m sec⁻¹ 之速度沿徑向向外移動。Kurihara(1976), Diercks and Anthes(1976 a,b) 認為此種雨帶之形成係因內動力波(internal gravity-inertia wave) 而引起。

三、熱帶低氣壓之發生及其必要條件

自從 Dunn(1940) 分析加勒比海之 24 小時氣壓變化，發現了東風波並指出此波動可能為熱帶低壓之起源後，以東風波為“先在擾動”而造成熱帶氣旋的說法大為盛行。此種波動的存在由 Rossenthal(1960), Wallace and Chang(1969) 及 Izawa(1972) 等人所作的波譜分析加以證實。Yanai(1961a) 用馬歇爾群島的特別觀測資料詳細的分析了東風波發展成颱風 Doris(1958) 的暖心形成過程。Riehl(1948, 1954) 強調颱風的生成需有先在低空擾動與高空輻散的密切配合，主張東風波與中緯度西風槽的相互作用為颱風發生的原因。Landers(1962) 認為不穩定東風波的發展與副熱帶高壓的位置南移有關，並以此高壓的位置與強度變化來預測東風波的發展。最近 Shapiro(1977) 並以非線性溫度平移的邊界值預測東風波發展成颱風的時間與地點。

自從 1960 年 TIROS-1 衛星發射後，提供了豐富的熱帶擾動高層觀測照片。東風波“先在擾動”為颱風發展的必要條件的說法逐漸受到懷疑。Gabits(1962) 認為對南太平洋地區而言，東風波所佔的角色很小，對低壓之發生並非必要條件。Sadler(1962) 由衛星資料的觀察，指出大部份的熱帶低壓源出於赤道槽內之渦動。Fett(1968) 認為颱風之發生與東風波無關，而係由 ITCZ 內之擾動發展而成。Agee(1972) 以 ATS-3 的圖片觀察熱帶低壓 Anna(1969) 的發展過程，也否定了東風波的想法，指出 Anna 的生成與 ITCZ 內水平風切有密切的關係。Sadler(1967) 基於全球的觀察指出，“所有的熱帶渦旋皆源出於方向相反的氣流所形成的水平風切帶”，這種低層強烈水平風切所形成的低壓性渦旋被認為是颱風發生的必要條件之一(Gray, 1968)。Palmen(1956) 另外提出三個基本條件，即(1)海面溫度超過 26° 或

27°C 之廣大海面，以便支持連續的對流活動，(2) 科氏參數大於某一最低值（赤道 5° ~ 8° 除外），(3) 基本流只有微弱的垂直風切，避免通風現象，使潛熱得以積聚。

對於第(1)項條件，Leipper and Volgenau (1972) 及 Gray (1975) 基於湧昇流的考慮，認為海面下 60 公尺內水風切（正渦旋度）及 Palmen 的三個必要條件之外，Gray (1975) 並加上了濕穩定度（地面至 500 mb 之相當位溫梯度）及 500 ~ 900 mb 層之平均相對濕度，綜合成為颱風的季節發生因子（Seasonal Genesis Parameter），他認為以上六個因子都能滿足的話，颱風發生的可能性最大。

四、颱風的發展與數值模擬

颱風的發展與熱帶大氣的垂直不穩定有密切之關係，而颱風之能源為海面暖濕大氣抬昇成雲所放出之潛熱亦早為人所知，Palmen (1948) 以加勒比海二月與九月溫度分佈做一比較，假定海面附近之空氣濕度為 85 %，九月時上昇空氣之溫度到 160 mb 層附近仍高於周圍之空氣，而二月則一般並不如此。這種垂直穩定度的變化與颱風的季節發生頻率很有關連。

Haque (1952) 與 Syono (1953) 首先以大氣條件不穩定下擾動發展之線型理論來說明颱風的發展過程，在 1950 年代成為颱風發展的有力理論。到 1960 年初，因電子計算機的進步，非線型方程的數值解變為可能，Kasahara (1961) 與 Syono (1962) 即開始以 Haque-Syono 理論為基礎做颱風的非線型數值實驗。結果發現上昇速度隨時間呈指數增加，且中心附近原始的大規模上昇區變成大小約 20 km 的小對流胞，與線型理論所期待的結果相反。Lilly (1960) 認為 Haque-Syono 理論並不適合颱風的發展，理由是，在條件不穩定大氣中水平尺度小的擾動發展率大，亦即積雲尺度的發展率遠比颱風尺度大很多。雖然 Haque 的理論顯示發展率最大的水平尺度為零，Kuo (1961) 指出，若考慮大氣粘滯性，最大發展率則移至積雲尺度。Kasahara (1961) 並指出，以粘滯性來壓制小對流胞之成長，使颱風發達，並不可能。Rosenthal (1964) 以較大的網格點做實驗也未能壓制小對流胞的形成。

這些數值實驗對颱風的模擬固然未能成功，但其結果顯示，在條件不穩定大氣中發生的颱風，內部有積雲對流存在的事實。Yanai (1961b) 認為颱風之能源來自水蒸氣凝結所放出之潛熱，而颱風尺度的大循環則供應積雲對流的水蒸氣，水氣藉積雲對流放出潛熱，造成颱風的暖心，從而產生運動的能量。因此他強調，條件不穩定的觀念並不直接與颱風關連，颱風內部之積雲所扮演的角色必需加以確認。實際觀測的研究也支持這種觀點，例如 Riehl and Malkus (1961) 對颱風 Daisy (1958) 的熱收支平衡以及 Yanai (1961a) 做的 Doris (1958) 暖心形成過程的研究，均指出積雲對流對熱量的向上輸送之重要性。

積雲對流與大規模大氣之間交互作用的問題，在 1960 年代以後乃成為颱風研究的重點。Charney and Elisassen (1964), Ogura (1964) 及 Ooyamb (1964) 同時提出了 CISK (第二種條件不穩定) 的觀念。他們指出，在濕熱帶條件不穩定大氣中，一個低層為正渦旋度的小振幅擾動，因摩擦導致的水氣輻合與迫昇作用 (Ekman pumping) 經由小尺度對流的潛熱釋放使大氣加熱，加熱產生的溫度場變化乃產生了大規模環流，藉科氏力的作用加強了低層的輻合作用，帶來更多的水氣與潛熱釋放。這種交替生長的回饋過程對熱帶大規模擾動的成長提出了定性的解釋。

要解決積雲與颱風兩個尺度截然不同現象的交互作用問題，有以下三種方法：(1) 去解同時適合颱風與積雲的方程式，(2) 颱風以大尺度控制方程系統表之，積雲對流以統計性質的方程式表示，由兩組方程式的相關項去研究兩者之間的關係，(3) 在颱風尺度的控制方程中，將積雲的效果以參數化的方法處理。第一種方法目前尚不可能做到，Kasahara and Asai (1967) 與 Lopez (1973) 曾試過第二種方法（唯不是以颱風為對象）。第三法性質上與第二法差不多，但較簡單，為目前所普遍採用。

積雲參數化模式可大致分成對流調節法與雲模式法兩大類。前者係將大規模大氣中的濕度與溫度場加以調節使成濕中性狀態，對流的效應對大規模大氣的影響就可藉此表示出來。此法用於颱風模式者有 Kurihara (1973) 與 Kurihara and Tuleya (1974) 等。簡單且能有效的把對流效應對環境大氣的影響表現出來是此法的優點，但此法對於

二種尺度之間的交互作用及回饋效應的瞭解並無幫助。雲模式法把小尺度對流對大尺度運動的影響直接用雲模式表示出來，祇要能決定雲的分佈及雲的溫度、濕度、動量等性質，對流的效應就可在大尺度控制方程式中計算出來。Kuo (1965, 1974), Ogura and Cho (1973), Kreitzberg and Perkey (1976), Anthes (1977a,b) 的方法屬於此類。此法比較能描述雲與環境之間的交互作用，但常會因使用不當的雲物理過程而得出不合理的結果。

Arakawa (1971) 指出，環境大氣並非直接由潛熱所加熱，而後經由隨伴上昇運動而生之下降運動所加熱，潛熱的角色僅在維持上昇氣流，而此上昇氣流引發下降運動。因此雲模式必需考慮沉降補償及逸入逸出作用。這一類的模式如 Arakawa (1971), Ooyama (1971), Arakawa and Schubert (1974), Israeli and Sarachik (1973), Fraedrich (1973, 1974) 等。

考慮積雲參數化於颱風的軸對稱二維模式如 Ooyama (1964, 1969), Ogura (1964), Kuo (1965), Yamasaki (1968 a,b,c), Rosenthal (1970 a,b, 1971 a,b, 1973), Sundqvist (1970 a,b, 1972), Kurihara (1975), Peng and Kuo (1975) 等可以相當成功的描述颱風的發展過程及模擬成熟颱風的結構。自從1970年代以來，由於計算機的高度發達，三維模式漸被採用，如 Anthes (1972), Kurihara and Tuleya (1974) 等，已能將颱風非軸對稱的發展階段以及螺旋雲帶加以模擬。近年來以實際觀察資料嘗試颱風預報的原始方程模式，如 Miller et al. (1972), Mathur (1974), Ceselski (1974), Ley and Elsbery (1976) 及 Hoke and Anthes (1977) 已經獲得相當良好的結果，因此鼓勵了美國 NMC 發展其半作業化模式 (Hovermal 1976)，該模式對1975與1976兩年颱風季節的實驗，證明效果不錯。另一方面，對於雙套網格點 (nested grid) 模式研究的進展，(Harrison, 1973, Kurihara and Tuleya 1974, Madala and Piacsck 1975, Mathur 1974 及 Jones 1977) 也解決了一些颱風數值預報作業化技術上的困難。

五、颱風路徑預報 (有問題) (以資料為準)

颱風路徑的預報，到目前為止還是以經驗方法為主，用動力預報仍在研究發展中。最近 Fett and Brand (1975) 用人造衛星的觀測來預報颱風的路徑。

Neuman and Hope (1973) 將 NHC 所用的幾種客觀預報法做一比較。NHC 所用的方法有 HURRAN, NHC-67, CLIPER, MOHATT 等方法。根據北大西洋的 tropical cyclones (1967-1971) 資料，發現 MOHATT 法比較好。

1977年，EPHC (Eastern Pacific (在太平洋)) Hurricane Center) 再將最近發展的統計預報法，NHC-67, NHC-72, NHC-73, CLIPER 等法加以比較，短期預報以 NHC-72 誤差最少。他們以 Analog Model (Brand, 1975) 為1976年度作業用。Neumann (1977) 用 Monte Carlo 法做預報。

以動力方法預報颱風路徑，以 Sanders Barotropic Model (SANBAR) (Sanders et al. 1975) 最有名。Miller et al. (1975) 最有名。Miller et al. (1972), Harrison (1973), Mathur (1974) 等用多層 Primitive equation model 探討颱風的成長與運動。

颱風發生時，若出現另一低氣壓或颱風，Brand (1968), Holliday (1973)，用15年 (1953-1967) 的資料，證實了兩者之間距離小於750哩時有相互作用。 S/H

六、颱風的強度變化

關於颱風強度變化與大氣條件之關係，過去雖有不少研究成果，但主要是探討雲，風，垂直溫度，海面溫度，濕度，溫度直減率，氣旋等因素與強度之關係。Miller (1958) 指出颱風之最低氣壓與其所行經之海面溫度有關，當東面之反氣旋增強及反氣旋右方之北風增強時，颱風強度會增加。

Jordan (1961) 發現當氣壓到達最低時，從地面到700 mb之大氣層中，溫度與濕度之變化甚大，此後氣溫直減率幾與濕直減率 (moist lapse rate) 相等，同時颱風眼的大小隨強度之增加而減少而在氣壓最低時為最小。Estoque (1971) 得知颱風之強度與其周圍之圓形卷雲雲牆 (canopy

)之直徑成比例。Riehl (1972)發現颱風由西北轉向東北(recurvature)後強度之減弱主要是由於緯度之增加。Willoughby (1973, 1974)發現海面溫度每升高 1°C 則氣壓降低之幅度為 $25 \sim 30 \text{ mb}$ ，且由微弱之熱帶氣旋到颱風的形成約需35小時。Ramage (1974)指出在暴風區之東北方面如有中高層之羽狀雲(plume)發展時，強度會增加。Smith (1975)研究得知動力不穩定並非決定強度增強之必要因素。Dvorak (1975)利用颱風雲圖的分類決定颱風的強度及24小時強度變化為現行颱風強度預報相當實用的方法。

七、颱風的風雨浪

由飛機觀測，探討風場的分佈及變化情況，如Colon (1963)以飛機觀測徑向風剖面，探討熱帶氣旋由加強至消散期間，隨時間變化的風場結構，發現颱風的演變似可分為兩種類型：其一為；特性最大風速位於小半徑(or Small eye)上，在生成期中發展得很快，然後生長期其眼的直徑幾乎很少減小，而其風場具有非常集中的最大風速區，且其反氣旋風切值很大，如1958年的Daisy。其二為；最初的風場非常不規則，最大風速半徑大(or large eye)，在發展過程中，眼的直徑減小許多，且風剖面具有小的反氣旋風切及最大風速的半徑較不集中之特性；通常有較大的環流，如1958年的Helen及1961年的Carla。在消散期間，中心氣壓的填塞，是伴隨着颱風眼直徑的增加，最大風速的減小和暴風範圍的增廣。

由飛機觀測周圍環境，計算其地表最大風速，所用的公式為 $V_m = 16 \sqrt{(P_n - P)}$ ，其中 P_n 為周圍環境海面壓力， P 為颱風中心海面壓力。若飛機不能飛入颱風眼觀測，則用dropsonde資料，所用的公式為 $V_m = 16 \sqrt{(P_n - P)/(1-P)}$ 其中 P 為距颱風中心一段normalized距離 $R (= r/r_m)$ ；通常指颱風眼外海面壓力。(r 為dropsonde觀測位置與雷達之距離， r_m 為圍繞颱風眼，最強雷達回波之距離)。

Dergarabedian (1970)對完全發展的氣象渦旋，提出兩種估計最大Azimuthal Velocity Component的方法，其一適於tornado，另一兼適於tornado及hurricane，是利用暴風外緣空

氣的tephigram來計算。他發現在颱風形成初期由海洋輸送到低層大氣中的熱及質量對颱風最大風速之估計可能很重要，而在颱風成熟期則不那麼重要。

颱風的兩區呈Spiral bands狀分佈，Gentry (1964)對hurricane rain bands研究，發現沿此bands風的變化很大，且與bands的micro-scale features有關。但其風速梯度沒有接近暴風中心，沿半徑方向的風速梯度大。大範圍的空氣交換發生於Outer bands及eye walls(眼牆)上，和在不同的bands與其緊鄰的周圍環境之間，此點可由bands兩側垂直於bands方向風的分量有很大的梯度看出。小部份的空氣由近地表上升至高層對流層與其周圍環境的空氣甚少混合，但大部份空氣上升至35000 ft高度時已與周圍不同高度的空氣完全混合了。此種垂直運動與混合作用影響颱風中溫度和能量的分佈。

對於氣旋及颱風所帶來的降水定量預報，Estoque (1957)對由大規模垂直運動所造成的降水定量預報提出圖解法，可得24小時的降水預報，此法應用於氣旋之發展頗為成功。通常颱風來襲時，其第二象限部位的風及雨為最甚，但是當颱風登陸時，其降雨及風力分布，由於地形分布及其他影響，而顯示複雜的分佈狀態。由於地形的加強影響，陸地上的降雨量比海洋上大許多，且陸地上觀測到的降水型態與同時雷達觀測到的降水帶(precipitation bands)不相類似。

Harris (1963)曾探討Storm Surge的特性，Jelesnianski (1972)的SPLASH是基於動力的誤點，發展一種特殊程式，計算颶風帶來的浪的振幅。有兩種方法，一種方法使用Precomputed nomograms來設計求得尖峯波浪值的方法。其中nomograms的概要是簡單的氣象參數。第二種方法：以動力模式及電子計算機計算沿海岸線的浪，以地表氣象參數為作業化程式的輸入資料。他曾對浪的現象作定性的解釋，並討論各種氣象參數，大陸棚地形及海岸地理對浪的相對重要性。

Pararas-Carayanis (1975)曾用橫越墨西哥灣及美國東海岸的歷史颶風資料，證實bathystrophic storm surge numerical model，並與幾個假設的暴風浪問題的理論結果(analy-

tic solution) 作比較。雖然由合併初始起源資料，底部摩擦係數及風應力之值，可得合理的經驗解答，但這些參數的重要性，變化及相互影響的關係，由於歷史資料有限，不能適當的決定出來。

八、颱風改造

颱風改造方面主要的有破風計劃(Project Stormofury)，目的在改造颱風，以利人類福祉。早期對Debbie (Gentry, 1969)及Ginger (Black, 1972)二個颱風進行改造試驗，結果似乎證實計劃可行。近來由於可用於改造試驗的颱風不多，工作重點在建立良好儀器設備(如NOAA/P3, C-130, NASA CV990氣象飛機等)，希望對颱風構造及動態有更進一步了解，再謹慎進行改造工作。

九、未來展望

數值模擬對熱帶氣旋發展與結構的了解很有幫助，今後的重點將放在颱風與積雲對流及颱風與大氣環流之間交互作用，以及 Air-Sea interaction 的研究上。積雲參數化仍將是一個熱門的研究問題。對於初生熱帶氣旋的觸發過程，也可能以數值模擬來研究。

颱風的預報將繼續依賴統計及氣候預報法。最近數值預報模式有顯著進步，不久的將來可望成爲颱風預報的重要參考工具。累積更多的數值預報經驗之後，颱風的MOS (Model Output Statistics) 預報法將極爲可行。同時利用人造衛星資料的預報法將繼續發展，成爲颱風預報最重要的工具。

對於熱帶大氣的了解，將由一連串的特殊觀測計劃，如1974年的GATE，最近即將開始的FGGE/MONEX計劃，帶至另一個境界。這些研究的成果，對颱風生成環境的瞭解將很有幫助。

颱風的改造目前仍在試驗階段，今後必然繼續這方面的研究，也許，有朝一日，人類不祇能充分瞭解颱風，也能將此大氣中威力極大的現象加以控制，並充分利用其資源。

誌謝

本文第五節至第八節部分，係由中研院物理所大氣組同仁共同完成，參與寫作的有簡來成，蕭錫

璋，柯順德，梁文傑，曾忠一，黃榮鑑等先生，特此誌謝。最後，特別感謝吳副局長完堯與廖教授學銓提供寶貴意見及資料，使本文得以順利刊出。

參考文獻

- Agee, E. M., 1972: Note on ITCZ wave disturbances and formation of tropical storm Anna. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 733-737.
- Anthes, R. A., 1972: Development of asymmetries in a three dimensional model of the tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.* 100, 461-476.
- _____, 1974: The dynamics and energetics of mature tropical cyclones. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 12, 495-522.
- _____, 1972a: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 270-286.
- _____, 1977b: Hurricane model experiments with a cumulus parameterization scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 287-300.
- _____, S. L. Rosenthal, and T. W. Trout, 1971: Preliminary results from an asymmetric model of the tropical cyclone. *Mon. Wea. Rev.* 99, 759-766.
- Arakawa, A., 1971: Parameterization of cumulus convection. *Tech. Rept. No. 7, Dept. of Meteor., UCLA.*
- _____, and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, part I. *J. Atmos. Sci.*, 31, 674-701.
- Atkinson, G. D., 1971: *Forecaster's Guide to Tropical Meteorology.* Air Weather Service, United States Air Force, *Tech. Rept. 240*, 360pp.

- Bell, G.J., and T. Kar-Sing, 1973: Some typhoon soundings and their comparison with soundings in hurricanes. *J. Appl. Meteor.*, 12, 74-93.
- Black, P.G., 1972: Some observations from hurricane reconnaissance aircraft of sea surface cooling produced by hurricane Ginger (1971), *Mariners Weather Log*, 16, 288-_____ , and R.A. Anthes, 1971: On the asymmetric structure of the tropical cyclone outflow layer. *J. Atmos. Sci.*, 28, 1348-1366.
- Brand, S., 1968: Interaction of binary tropical cyclones of the western north Pacific. Environmental Prediction Research Faculty, Naval Postgraduate School, Monterey, Ca., 26-68.
- _____, J.M. Long, J.W. Blueloch, and G.D. Hamilton, 1975: A Tropical cyclone analog program for the North Indian Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, 103, 258-261.
- Charney, J.G., and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression, *J. Atmos. Sci.*, 21, 68-75.
- Ceselski, B.F., 1974: Cumulus convection in weak and strong tropical disturbances. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1241-1255.
- Colon, J.A., 1963: On the evolution of the wind field during the life cycle of tropical cyclones. NHRP-R-65, 40pp.
- _____, and Staff, 1961: On the structure of hurricane Daisy (1958). National Hurricane Research Project, U.S. Weather Bureau, Rept. No. 48, 102pp.
- Dergarabedian, P., 1970: On estimation of maximum wind speeds in tornadoes and hurricanes. *J. Astron. Sci.*, 20, 9-34.
- Diercks, J.W., and R.A. Anthes, 1976a: A diagnostic study of spiral rainbands in nonlinear hurricane model. *J. Atmos. Sci.*, 33, 959-975.
- _____, 1976b: A study of spiral bands in a linear model of a cyclonic vortex. *J. Atmos. Sci.*, 33, 1714-1729.
- Dunn, G.E., 1940: Cyclogenesis in the tropical Atlantic. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 21, 215-229.
- Dvorak, V.F., 1975: tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery, *Mon. Wea. Rev.*, 103, 420-430.
- Estoque, M.A., 1957: An approach to quantitative precipitation forecasting. *J. Meteor.*, 50-54.
- _____, 1971: Hurricane intensity and upper level cloudiness. NOAA-71121450, 36pp.
- Fendell, F.E., 1974: Tropical cyclones. *Advances in Geophysics*, 17, 1-100.
- Fett, R.W., 1968: Typhoon Formation within the zone of intertropical convergence. *Mon. Rev.*, 96, 106-117.
- _____, and S. Brand, 1975: Tropical cyclone movement forecasts based on observations from satellites. *J. Appl. Meteor.*, 14, 452-465.
- Fraedrich, K., 1973: On the parameterization of cumulus convection by lateral mixing and compensating subsidence, Part I., *J. Atmos. Sci.*, 30, 409-413.
- _____, 1974: Dynamic and thermodynamic aspects of the parameterization of cumulus convection. Part

- II., J. Atmos. Sci., 31, 1848-1849.
- Frank, W.M., 1977: The structure and energetics of the tropical cyclone, I. storm structure. Mon. Wea. Rev., 105, 1119-1135.
- Cabites, J.F., 1962: The origin of tropical cyclones. Proc. Interregional Seminar on Tropical Cyclones, Tokyo, 53-58.
- Gentry, R.C., 1964: A study of hurricane rainbands. NHRP-R-69, 90pp.
- _____, 1969: Hurricane Debbie modification experiments. Science, 168, 473-
- Gray, W.M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. Mon. Wea. Rev., 96, 669-700.
- _____, 1975: Tropical cyclone genesis. Pap. No. 234, Dept. Atmos. Sci., Colorado State University, Fort Collins, 121pp.
- Haque, S.M.A., 1952: The initiation of cyclonic circulation in a vertically unstable stagnant air mass. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 78, 394-406.
- Harris, D.L., 1963: Characteristics of the hurricane storm surge, USDC/WB/TP-48, 145pp.
- Harrison, E.J. Jr., 1973: Three-dimensional numerical simulation of tropical systems utilizing nested fine grids. J. Atmos. Sci., 30, 1528-1543.
- Hawkins, H.F., and D.T. Rubsam, 1968: Hurricane Hilda, 1964, II. structure and budgets of the hurricane on October 1, 1964. Mon. Wea. Rev., 96, 617-636.
- Hoke, J.E., and R.A. Anthes, 1977: Dynamic initialization of a three dimensional primitive equation model of hurricane Alma of 1962. Mon. Wea. Rev., 105, 1266-1280.
- Holliday, C.R., 1973: Multiple tropical storms in western north Pacific. Mon. Wea. Rev., 101, 444-445.
- Hovvrmale, J.B., 1976: The movable fine mesh (MFM)-a new operational forecast model. Tech. Proc. Bull. No. 160, Tech. Serv. Br., Meteor. Serv. Div., National Weather Service, Rockville, Md. 5pp.
- Israeli, M., and E.S. Sarachik, 1973: Cumulus parameterization and CISK. J. Atmos. Sci., 30, 582-589.
- Izawa, T., 1964: On the mean wind structure of typhoon. Tech. Note No. 2, Meteorological Research Institute, JMA, 19pp.
- Izawa, T., 1972: Some considerations on the continuous spacetime spectral analysis of atmospheric disturbances. Papers in Meteor. and Geophys., 23, 1-71.
- Jelesnianski, C.P., 1972: SPLASH (Special Program to List Amplitudes of Surges from Hurricanes) Part I. landfall storms. NOAA-TM-NWS-TDL-46, 48pp.
- _____, 1974: SPLASH Part II. general track and variant storm conditions, NOAA-TM-NWS-TDL-52, 62pp.
- Jones, R.W., 1977: A nested grid for a three-dimensional model of a tropical cyclone. J. ATMOS. SCI., 34, 1528-1553.
- Jordan, C.L., 1965: Marked changes in the characteristics of eye of intense typhoon between the deepening and filing stages. NHRPR-44, Dept. of Meteor., Fla. State Univ. Tal-

- lahassee, 24pp.
- _____, and E.S. Jordan, 1954: On the mean thermal structure of tropical cyclones. *J. Meteor.*, 11, 440-448.
- Jordan, E.S., 1952: An observational study of upper wind circulation around tropical storm. *J. Meteor.*, 9, 340-346.
- Kasahara, A., and T. Asai, 1967: Effects of an ensemble of convective elements on the large-scale motions of the atmosphere. *J. Met. Soc. Japan*, 45, 280-291.
- Kasahara, A., 1961: A numerical experiment on the development of a tropical cyclone. *J. Meteor.* 18, 259-282.
- Koteswaram, P., 1967: On the structure of hurricanes in the upper troposphere and lower stratosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 95, 541-564.
- Kreitzberg, C.W., and D.J. Perkey, 1976: Release of potential instability. Part I. A sequential plume model within a hydrostatic primitive equation model. *J. Atmos. Sci.*, 33, 456-475.
- Kuo, H.L., 1961: Convection in conditionally unstable atmosphere, *Tellus*, 13, 441-459.
- _____, 1965: On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 22, 40-63.
- _____, 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1232-1240.
- Kurihara, Y., 1973: A scheme of moist convective adjustment. *Mon. Wea. Rev.*, 101, 547-553.
- _____, 1975: Budget analysis of a tropical cyclone simulated in an axisymmetric numerical model. *J. Atmos. Sci.*, 32, 25-59.
- _____, 1976: On the development of spiral bands in a tropical cyclone. *J. Atmos. Sci.*, 33, 940-985.
- _____, and R.E. Tuleya, 1974: Structure of a tropical cyclone developed in a three dimensional numerical simulation model. *J. Atmos. Sci.*, 31, 893-919.
- Landers, H., 1962: On the formation and development of tropical storms. Rept. to U.S. Wea. Br. Fla. State Univ. Dept. of Meteor., 79pp.
- Laseur, N.E., and H.F. Hawkins, 1963: An analysis of hurricane Cleo (1958) based on data from research reconnaissance aircraft. *Mon. Wea. Rev.*, 91, 694-709.
- Leipper, D.F., and D. Volgenau, 1972: Hurricane heat potential of the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 2, 218-214.
- Ley, G.W., and R.L. Elsbery, 1976: Forecasts of typhoon Irma using a nested-grid model. *Mon. Wea. Rev.* 104, 1154-1161.
- Lilly, D.K., 1960: On the theory of disturbances in a conditionally unstable atmosphere. *Mon. Wea. Rev.*, 88, 1-17.
- Lopez, R.E., 1973: Cumulus convection and larger scale circulation II. cumulus and mesoscale interactions. *Mon. Wea. Rev.*, 101, 856-870.
- Madala, R.V., and S.A. Piacsek, 1975: Numerical simulation of asymmetric hurricanes on a B-plane with ver-

- tical shear. *Tellus*, 27, 453-468.
- Mathur, M.B., 1974: A multiple-grid primitive equations model to simulate the development of an asymmetric hurricane. *J. Atmos. Sci.*, 31, 371-393.
- Miller, B.I., 1958: On the maximum intensity of hurricanes. *J. Meteor.*, 15, 184-195.
- _____, 1967: Characteristics of hurricanes. *Science*, 157, 1389-1399.
- _____, P.P. Chase, and B.R. Jarvinen, 1972: Numerical prediction of tropical weather system. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 825-835.
- Neumann, C.J., and J.R. Hope. 1973: A Diagnostic study on the statistical predictability of tropical cyclone motion. *J. Appl. Meteor.* 12, 62-73.
- Neumann, C.J., M.B. Lawrence, and E.L. Caso, 1977: Monte Carlo significance testing as applied to statistical tropical cyclone prediction model. *J. Appl. Meteor.*, 16, 1165-1174.
- Ogura, Y., 1964: Frictionally controlled, thermally driven circulations in a circular vortex with application to tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, 21, 610-621.
- _____, and H.R. Cho, 1973: Diagnostic determination of cumulus cloud populations from observed large-scale variables. *J. Atmos. Sci.*, 30, 1267-1286.
- Ooyama, K., 1964: A dynamical model for the study of tropical cyclone development. *Geofis. Intern. (Mexico)* 4, 187-198.
- _____, 1969: Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.*, 26, 3-40.
- _____, 1971: A theory on parameterization of cumulus convection. *J. Met. Soc. Japan*, 49, special issue, 744-756.
- Palmen, E., 1948: On the formation and structure of tropical hurricanes. *Geophysica*, 3, 26-38.
- _____, 1956: A review of knowledge of the formation and development of tropical cyclones. *Proc. Trop. Cyclone Symp. Brisbane, Australia*, 213-232.
- _____, and C.L. Jordan, 1955: Note on the release of kinetic energy in tropical cyclones. *Tellus*, 7, 186-189.
- _____, and C.W. Newton, 1969, *Atmospheric Circulation Systems. Their Structure and Physical Interpretations*. Academic Press, 471-522.
- Pararas-Carayannis, G., 1975: Verification study of a bathystrophic storm surge model. *CERC-TM-50*, 248pp.
- Peng, L., and H.L. Kuo, 1975: A numerical simulation of the development of tropical cyclones. *Tellus*, 27, 133-144.
- Ramage, C.S., 1974: The typhoons of October 1970 in the south China sea: intensification, decay and ocean interaction. *J. Appl. Meteor.*, 13, 739-751.
- Riehl, H., 1948: On the formation of typhoons. *J. Meteor.*, 5, 247-264.
- _____, 1954: *Tropical Meteorology*. McGraw-Hill, 392pp.
- _____, 1972: Intensity of recurved typhoons. *J. Appl. Meteor.*, 11, 613-615.

- _____, and J. Malkus, 1961: Some aspects of hurricane Daisy, 1958. *Tellus*, 13, 181-213.
- Rosenthal, S.L., 1960: Some estimates of the power spectra of large-scale disturbances in the low latitudes. *J. Meteor.*, 17, 259-263.
- _____, 1964: Some attempts to simulate the development of tropical cyclones by numerical methods. *Mon. Wea. Rev.*, 92, 1-21.
- _____, 1970a: Experiments with a numerical model of tropical cyclone development. Some effects of radial resolution. *Mon. Wea. Rev.*, 98, 106-120.
- _____, 1970b: A circularly symmetric primitive equation model of tropical cyclone development containing an explicit water vapor cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 98, 643-663.
- _____, 1971a: A circularly symmetric primitive equation model of tropical cyclones and its response to artificial enhancement of the convective heating functions. *Mon. Wea. Rev.*, 99, 414-426.
- _____, 1971b: The response of a tropical cyclone model to variations in boundary layer parameters, initial conditions, lateral boundary conditions and domain size. *Mon. Wea. Rev.*, 99, 767-777.
- _____, 1973: Hurricane modeling experiments with a new parameterization for cumulus convection. NOAA Tech. Memorandum ERL WMPO-4, 41pp.
- Sadler, J.C., 1962: Utilization of meteorological satellite cloud data in tropical meteorology. Proc. of the First International Symposium on Rocket and Satellite Meteor. Washington, D.C., 333-356.
- _____, 1967: On the origin of tropical vortices. Proc. of the Working Panel on Tropical Dynamic Meteorology, NWRP 12-1167-132, Navy Weather Research Facility, 39-76.
- Sanders, F., A.C. Pike, and J.P. Gertner, 1975: A barotropic model for operational prediction of tracks of tropical storms. *J. Appl. Meteor.*, 14, 265-280.
- Senn, H.V., and H.W. Hiser, 1959: On the origin of hurricane spiral rainbands. *J. meteor.*, 16, 419-426.
- Shapiro, L.J., 1977: Tropical storm formation from easterly waves: A criterion for development. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1007-1021.
- Shea, D.J., and W.M. Gray, 1973: The hurricanes inner core region I: symmetric and asymmetric structure, II. thermal stability and dynamic characteristics. *J. Atmos. Sci.*, 30, 1544-1576.
- Sheets, R.C., 1969: Some mean hurricane soundings. *J. Appl. Meteor.*, 8, 134-146.
- Smith, C.L., 1975: On the intensification of hurricane Celia (1970). *Mon. Wea. Rev.*, 103, 131-148.
- Stear, J.R., 1965: Sounding in the eye of hurricane Arlene to 108, 760 feet. *Mon. Wea.*, 93, 380-382.
- Sugg, A.L., 1968: Beneficial aspects of the tropical cyclone. *J. Appl. Meteor.*, 7, 39-45.
- _____, L.G. Pardue and R.L. Carrodus, 1971: Memorable hurricanes of the United States since 1873. NOAA Tech. Memo. NWS-SR-56,

- 52pp.
- Sundqvist, H., 1970a: Numerical simulation of the development of tropical cyclones with a ten-level model, part I. *Tellus*, 22, 359-390.
- _____, 1970b: Numerical simulation of the development of the tropical cyclone with a ten level model, part II. *Tellus*, 22, 504-510.
- _____, 1972: Model tropical cyclone behaviour in experiment related to modification attempts. *Tellus*, 24, 6-12.
- Syono, S., 1953: On the formation of tropical cyclones. *Tellus*, 5, 179-195.
- _____, 1962: A numerical experiment of the formation of tropical cyclones. *Proc. Inter. Symp. Numerical Weather Prediction*, Tokyo, 1960, Meteor. Soc. Japan, 405-418.
- Wallace, J.M., and C.P. Chang, 1969: Spectrum analysis of large scale wave disturbances in the tropical lower troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 26, 1010-1025.
- Willoughby, H.E., 1973: On the intensity of hurricanes in relation to the sea's temperature. *Naval Academy, Dept. of Environmental sciences, Rept. No. ES-2*, 12pp.
- Willoughby, H.E., 1974: The non-linear growth of hurricanes through CISK. *Naval Academy, Dept. of Environmental Sci., Rept. No. ES-3*, 26pp.
- Yamasaki, M., 1968a: Numerical simulation of tropical cyclone development with the use of primitive equations. *J. Met. Soc. Japan*, 46, 178-201.
- _____, 1968b: A tropical cyclone model with parameterized vertical partition of released latent heat. *J. Met. Soc. Japan*, 46, 202-214.
- _____, 1968c: Detailed analysis of a tropical cyclone simulated with a 13-layer model. *Pap. Meteor. Geophys.*, 19, 559-585.
- Yanai, M., 1964: Formation of tropical cyclones. *Rev. Geophys.*, 2, 367-414.
- _____, 1961a: A detailed analysis of typhoon formation. *J. Met. Soc. Japan*, 39, 187-214.
- _____, 1961b: Dynamical aspects of typhoon formation. *J. Met. Soc. Japan*, 39, 282-309.
- 山岬正紀, 井沢龍夫, 門脇俊一郎, 野本眞一, 岡村存, 及奥田穰, 1976: 颱風特集, 日本氣象學會, 研究ノ一ト第129號, 267頁。
- 徐天樂, 1976: 熱帶氣象學(修訂本), 空軍訓練司令部編印, 364頁。